



CÁLCULO DE LA HUELLA VIRTUAL DEL AGUA EN EL PROCESO PRODUCTIVO Y BENEFICIADO DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN HUATUSCO, MÉXICO, UTILIZANDO EL SOFTWARE CROPWAT 8.0 †

[CALCULATION OF THE VIRTUAL WATER FOOTPRINT IN THE COFFEE PRODUCTION AND PROCESSING OF (*Coffea arabica* L.) IN HUATUSCO, MEXICO, USING CROPWAT 8.0 SOFTWARE]

S. Sánchez Hernández^{1*}, J.G. Cruz Castillo², G. Partida Sedas²,
E. Escamilla Prado² and E. Valdés Velarde¹

¹Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México –Texcoco Chapingo, México. CP 56230. Email: ser89nangio@gmail.com*
evaldesv@chapingo.mx

²Centro Regional de Oriente, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal Huatusco-Xalapa Km. 6.5, 94100 Huatusco de Chicuellar, Veracruz, México. Email: jcruz@chapingo.mx; jpartidas@chapingo.mx; eescamilla@chapingo.mx

*Corresponding author

SUMMARY

Background: The use and expenditure of water within agriculture is of vital importance, especially in coffee farming, therefore it is very important to know that the virtual water in the production of coffee beans, as well as in the process of wet processing (transformation of cherry coffee to dry parchment coffee), so far there is no data on the use of virtual water in coffee production in the study region. **Objective:** To determine the virtual water (green and gray) calculation of the virtual footprint by means of the FAO program CROPWAT 8.0 and the calculation of water expenditure in coffee mills in the region of Huatusco, Veracruz. **Methodology:** The program CROPWAT 8.0 was obtained, and normal climatological data were reviewed to obtain the data and to be able to make the calculations to obtain the virtual footprint, subsequently the water expenditure was measured in five wet coffee mills, for this purpose the mills were visited during the harvest season and the measurements could be made. **Results:** A total green and gray virtual footprint of 977.61 m³/kg of coffee produced in the field production process was estimated. In relation to the virtual water expenditure in the wet coffee mills where water expenditure was measured: two of the five mills analyzed had the following data: The third mill reached an expense of 566 m³/kg of processed cherry coffee and the five mill had an amount of 162 m³/kg of processed cherry coffee and an average of 155.13 m³/kg of processed coffee. In total, the virtual footprint obtained: green, gray and water consumption in the processing process was 1132.73 m³/kg of parchment coffee. The blue virtual footprint was considered zero since irrigation is not used in the region for coffee production. **Implications:** The data found are the pioneers in the calculation of the virtual footprint of the species (*Coffea arabica* L.) more studies on this subject are needed in the region which will raise awareness about the virtual footprint generated in the coffee production and processing process, as well as proposed alternatives for a more sustainable use. **Conclusions:** The virtual footprint obtained was high in the study region and like studies carried out in other countries, which indicates that there is an awareness of how much water is used in the production and processing of coffee, as well as its impact in the short, medium and long term.

Key words: sustainability; water; virtual footprint; wet process.

RESUMEN

Antecedentes: El uso y gasto de agua dentro de la agricultura es de vital importancia, sobre todo en la cafecultura, por ello es muy importante medir el agua virtual en la producción del grano de café, así como en el proceso del beneficiado húmedo (transformación del café cereza a café pergamino seco), por lo que hasta el momento no se tienen datos sobre el uso del agua virtual en la producción de café en la región de estudio. **Objetivo:** Determinar el agua virtual (verde y gris) cálculo de la huella virtual por medio del programa de FAO CROPWAT 8.0. y el cálculo del gasto de agua en beneficios de la región de Huatusco, Ver. **Metodología:** Se obtuvo el programa denominado CROPWAT 8.0 y se revisaron normales climatológicas para la obtención de datos y poder realizar los cálculos para obtener a huella virtual, posteriormente se midió el gasto de agua en cinco beneficios húmedos de café, para ello se

† Submitted November 12, 2023 – Accepted August 19, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5251>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = S. Sánchez Hernández: <https://orcid.org/0009-0000-6317-6669>; S. Partida Sedas <https://orcid.org/0000-0003-0329-9901>

visitaron los beneficios en temporada de cosecha y poder realizar las mediciones. **Resultados:** Se estimó una huella virtual verde y gris total de 977.61 m³/kg de café producido en el proceso de producción en campo. En relación con el gasto de agua virtual en los beneficios húmedos de café en donde se midió el gasto de agua: dos de los cinco beneficios analizados tuvieron los siguientes datos: el beneficio tres alcanzó un gasto de 566 m³/por kg de café cereza procesado y en el beneficio cinco se tuvo la cantidad de 162 m³/kg de café cereza procesado y un promedio de 155.13 m³/kg de café procesado. En total, la huella virtual obtenida: verde, gris y el gasto de agua en el proceso de beneficiado fue de 1132.73 m³/kg de café pergamino. La huella virtual azul se consideró cero ya que en la región no se utiliza riego para la producción de café. **Implicaciones:** Los datos encontrados son los pioneros en el cálculo de la huella virtual de la especie (*Coffea arabica* L.) se necesitan realizar más estudios sobre esta temática en la región lo que permitirá tomar conciencia sobre la huella virtual generada en el proceso de producción y beneficiado de café, así como proponer alternativas para un uso más sostenible. **Conclusiones:** La huella virtual obtenida resultó ser alta en la región de estudio y similar con trabajos realizados en otros países lo que indica que hay una conciencia en saber cuánto se gasta de agua en la producción y beneficiado del café, así como su impacto a corto mediano y largo plazo.

Palabras clave: sustentabilidad; agua; huella virtual; beneficio húmedo.

INTRODUCCIÓN

Se han empleado dos metodologías para hacer una cuantificación más detallada del agua virtual de un producto. La primera metodología cuantifica el agua desde el punto de vista del productor, tomando en consideración el agua que se usó efectivamente para la elaboración del producto. La cuantificación del “agua virtual” en este caso dependerá del lugar donde se produjo, del momento en que se produjo y de la eficiencia en el uso del agua. Los requerimientos de agua para producir un kilo de granos en un país árido pueden ser tres y cuatro veces mayores que los necesarios para producir lo mismo en un país húmedo (Hoekstra, 2003).

Huella virtual verde es el volumen de agua lluvia que no se convierte en escorrentía, por lo que se almacena en los estratos permeables superficiales y así satisface la demanda de la vegetación. Esta agua subterránea poco profunda es la que permite la existencia de la vegetación natural y vuelve a la atmósfera por procesos de evapotranspiración (Hoekstra *et al.*, 2009).

Huella virtual gris es el volumen de agua necesaria para que el cuerpo receptor reciba el vertido contaminante asociado a la cadena de producción y/o suministro sin que la calidad del agua supere los límites permitidos por la legislación vigente. Se calcula como el volumen de agua adicional teórica necesaria en el cuerpo receptor, por lo que no se refiere a generar un nuevo consumo, sino a reducir el volumen del contaminante (Hoekstra *et al.*, 2009).

El beneficio convencional o húmedo del café es el proceso que tradicionalmente se ha utilizado para transformar el fruto en café pergamino, en el cual se utiliza agua en las etapas de despulpado y de lavado, con un consumo global cercano a los 40 L de agua por cada kilogramo de café pergamino seco obtenido (Rodríguez *et al.*, 2013).

Se desconoce la huella virtual en la producción de café en la región de Huatusco que es una de las zonas de mayor importancia en la producción y exportación de café en Veracruz, México. Lo que aporta el 80% de la producción total de café en el Estado de Veracruz. En la región cafetalera de Huatusco, Veracruz, se encuentran 10 beneficios de café que trabajan año con año, generando contaminación del agua limpia en los cuales no se han realizado evaluaciones del gasto de esta (Suazo, 2023).

El objetivo del presente estudio fue determinar el agua virtual verde y gris en la producción de café en la región cafetalera de Huatusco, Veracruz mediante el software CROPWAT 8.0.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La región de Huatusco se encuentra en la zona montañosa del estado de Veracruz con una precipitación de 750 a 3,000 mm, y temperaturas entre 16 °C y 22 °C (INEGI, 2010). La mayor producción de café en esta región se lleva a cabo en una altitud de 900 hasta 1450 msnm, y mayormente es bajo sombra (Villers *et al.*, 2009)

Se identificó el manejo agronómico del cultivo de café: siembra, fertilización, si se aplica riego, cosecha y postcosecha. Con la intención de conocer las etapas en donde se utiliza la mayor cantidad de agua.

El programa de cómputo CROPWAT 8.0 incorpora procedimientos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y los requerimientos de agua de los cultivos y permite la simulación del uso del agua por los cultivos bajo diferentes condiciones de clima, cultivos y suelos.

Los datos climatológicos que se tomaron de los últimos 30 años fueron obtenidos de la estación de meteorología de Totutla, Veracruz (altitud: 1446 m,

Latitud: 19°12'45", Longitud: 96°57'50" w) utilizando el programa de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), Power Data Access Viewer. La temperatura, la velocidad del viento, la evaporación, el brillo solar, la radiación solar, la humedad relativa y la precipitación fueron considerados.

Con el apoyo del software POWER Data Access Viewer de la NASA se obtuvo la evapotranspiración efectiva (el cual aportó datos para ser utilizados en CROPWAT) (Tabla 1). Valor necesario para calcular la precipitación efectiva y posteriormente, con el software CROPWAT 8.0, utilizando las variables indicadas (clima, manejo, suelo, coeficiente del cultivo, crecimiento radicular y etapas de desarrollo, floración y maduración del café) de un ciclo de producción, un año aproximadamente. Se obtuvo la evapotranspiración potencial o de referencia que es (la máxima cantidad de agua que una superficie totalmente cubierta de vegetación y que no padece de falta de agua puede liberar al aire en las condiciones atmosféricas al momento que se realiza el cálculo) (Sánchez y Carvacho, 2006). La precipitación efectiva (es la que puede ser utilizada por las plantas, lo que significa que no toda la precipitación está a disposición de los cultivos, ya que una parte se pierde a través de la escorrentía superficial y la percolación profunda (Allen, 1989)), también fue calculada. Esto considerando fechas de siembra y las etapas de crecimiento del cafeto, cuyos valores fueron tomados de Allen *et al.* (2006) y de Cisneros *et al.* (2015) y fue calculado por el programa por medio del método de Penman-Monteith; Allen *et al.* (1998).

Posteriormente, se utilizaron datos de temperatura media y mínima, humedad, insolación y velocidad del viento del programa POWER Data Access Viewer de la NASA, se obtuvo la precipitación efectiva mensual y anual con CROPWAT. La precipitación efectiva anual fue de 1050.1 mm (Tabla 2).

Las etapas de desarrollo del cultivo de café en la región de Huatusco, Veracruz, que fueron consideradas (Figura 1). Estas son las fases del cultivo desde desarrollo, floración hasta maduración del fruto en días, profundidad radicular 45 cm: se refiere a lo profundo de la raíz del cafeto, Agotamiento crítico: agotamiento inicial de humedad en el suelo. F: respuesta de rendimiento del cultivo y altura del cultivo: se refiere a la altura del cafeto, referencia ofrecida por Allen *et al.* (2006).

El coeficiente del cultivo (Kc) se obtuvo con CROPWAT 8.0 y se define como la relación entre las necesidades hídricas del cultivo (ETc) y la evapotranspiración de una superficie de referencia (ETo). La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto (*Cynodon dactylon* (L.) Pers. que se caracteriza por poseer una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo (Torres *et al.*, 2017).

Con la obtención del dato del coeficiente de cultivo (Kc) y junto con la (evapotranspiración de referencia) ETo, se utilizan para calcular las tasas de evapotranspiración del cultivo del cafeto, la importancia del cálculo del dato es que se utiliza para conocer la evapotranspiración del cultivo en la región de estudio.

Tabla 1. Cálculo de la evapotranspiración potencial del cultivo de café en la región centro de Huatusco Veracruz, México.

Mes	Temp min °C	Temp max °C	Humedad %	Viento Km/día	Insolación Horas	Radicación MJ/m ² /día	Evapotranspiración de referencia Mm/día
Enero	12.5	22.1	10	3	3.5	11.3	1.46
Febrero	15.1	27.4	11	3	4.3	13.6	1.93
Marzo	14.8	27.1	10	3	4.9	16.0	2.38
Abril	16.8	31.4	10	3	5.3	17.6	2.75
Mayo	20.4	33.2	13	2	5.6	18.3	3.13
Junio	20.3	28.6	15	2	5.6	18.2	3.17
Julio	18.9	27.4	14	2	5.6	18.2	3.02
Agosto	19.9	28.6	15	2	5.4	17.7	2.96
Septiembre	19.0	26.9	15	2	4.7	15.9	2.63
Octubre	18.3	25.5	15	2	4.5	14.2	2.23
Noviembre	15.5	23.4	12	2	3.9	12.0	1.72
Diciembre	13.4	23.0	10	2	3.4	10.7	1.45
Promedio	17.1	27.1	13	2	4.7	15.3	2.40

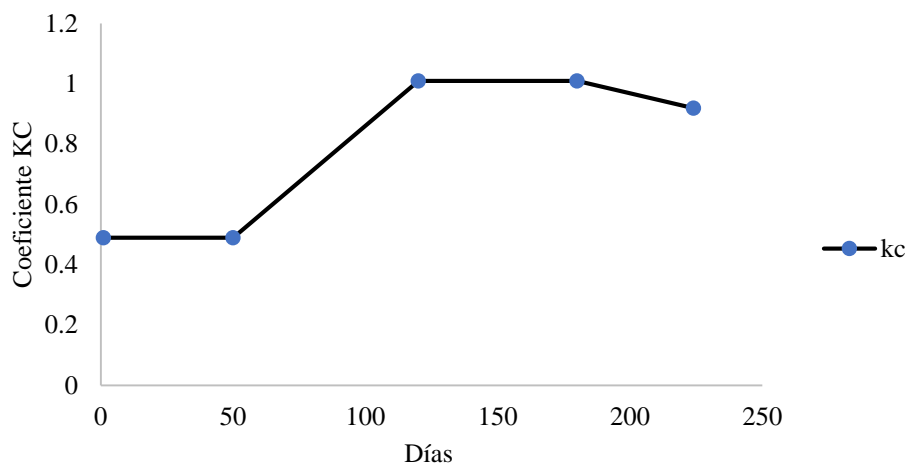


Figura 1. Información general del cultivo de café introducida al programa CROPWAT 8.0.

Tabla 2. Cálculo de la precipitación efectiva mensual y anual (mm) con CROPWAT en la región centro de Huatusco Veracruz, México.

Meses	Precipitación	Precipitación efectiva
Enero	13.8	13.5
Febrero	27.1	25.9
Marzo	66.5	59.4
Abril	49.6	45.7
Mayo	113.8	93.1
Junio	221.2	142.9
Julio	233.9	146.4
Agosto	299.8	155.0
Septiembre	393.0	164.
Octubre	219.3	142.4
Noviembre	35.1	33.1
Diciembre	29.9	28.5
Total	1703.0	1050.1

Posteriormente, se utilizó el programa con toda la información del suelo presentes en la región cafetalera del centro de Veracruz, el cual es considerado franco-arenoso. Estos datos se obtuvieron de Escamilla-Prado (2007), Fernández-Ojeda *et al.* (2016) y Álvarez-Sánchez *et al.* (2020) para realizar el balance hídrico y calcular el requerimiento de agua para el cultivo de café.

Se utilizó la textura suelo franco-arenoso para calcular la humedad del suelo inicialmente disponible del cafeto ya que se trata de la textura presente en la región de estudio y con capacidad de campo de 120 mm/m (Fernández-Ojeda *et al.*, 2016).

La huella virtual verde se obtuvo con el cociente entre el agua de lluvia disponible para el cultivo proveniente de la precipitación y el rendimiento del cultivo. La

cantidad de agua que es aprovechada por el cultivo proveniente de precipitación es equivalente a la precipitación efectiva, por lo cual la huella hídrica verde puede entenderse como la razón entre la precipitación efectiva del lugar donde se ubica el cultivo de café con el rendimiento de este.

$$HVverde = \frac{Ppef}{Y}$$

Donde:
 HV verde= Huella Virtual Verde m³/t⁻¹
 Ppef= Precipitación efectiva en mm
 Y= Rendimiento t⁻¹/m²

La estimación de la huella virtual gris depende de la tasa de aplicación de productos químicos por ha⁻¹, la fracción de lixiviación, el rendimiento del cultivo, la concentración máxima permisible y la concentración natural de los contaminantes en el cuerpo de agua receptor. La huella virtual gris se calcula a partir de la multiplicación de la tasa de aplicación de los productos químicos por la fracción de lixiviación que corresponde al porcentaje de la sustancia de interés, que se percola o se infiltra a través del suelo y llega al nivel freático. Esta variable fue hallada experimentalmente tomando una fracción del suelo que tuviese en cuenta todos los horizontes. Se hizo pasar un litro de agua a través de este y se contabilizó la fracción de agua que quedaba entre las partículas de este después de un tiempo determinado (20 minutos). El resultado del experimento fue que el 80% del agua quedaba atrapado y solamente el 20% se infiltraba, por lo cual se ha asumido la fracción de 0.2, que es equivalente al 20%, dividido entre la diferencia de concentraciones, es decir, la concentración máxima menos la concentración natural (la presente en el ambiente) de la fuente receptora, todo lo anterior dividido entre el rendimiento del cultivo de café.

$$HV_{gris} = \frac{(\alpha * AR)/(C_{max} - C_{nat})}{Y}$$

Donde:

α : fracción de lixiviación de agua de riego aplicada.

AR: cantidad de fertilizante aplicada al cultivo kg^{-1}/ha^{-1}

C_{max} : concentración máxima permisible de contaminante en la fuente receptora. C_{nat} : concentración natural del contaminante en la fuente receptora.

Y: rendimiento del cultivo t^{-1}/ha^{-1}

El cálculo de la tasa de aplicación de productos químicos se realizó con el N de la fórmula química NPK de 10-20-20. Este es el tipo de fertilizante más usado en la región de estudio. También, se obtuvo la concentración de N en el agua que fue de 2.6 mg/L (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 1996). El rendimiento utilizado fue de 5.5 $t^{-1}/de\ café/ ha^{-1}$, este dato se tomó de la cosecha 2018- 2019 de producción de café en la región de estudio (Partida-Sedas *et al.*, 2021)

Con los valores de los componentes de la huella virtual (azul, verde y gris) se obtiene la huella hídrica total (m^3/t^{-1})

$$HV_{total} = HV_{azul} + HV_{verde} + HV_{gris}$$

Esta información es útil para conocer los requerimientos hídricos del cultivo en cada etapa fenológica y tomar medidas necesarias para su correcto desarrollo (Viveros-Garza, 2022).

También, se evaluó el gasto de agua en el proceso de beneficiado húmedo (proceso que se realiza al café cereza maduro y que pasa por diferentes etapas hasta llegar a café pergamino seco con humedad del 12%. En la región de Huatusco Veracruz. Se incluyeron datos de cinco beneficios, dos de ellos trabajan de manera ecológica. En cada beneficio se tomaron 20 datos de tiempo de llenado de un recipiente de 20 L y se obtuvo un promedio. tanto en el área de despulpe como en el área de lavado, se tomaron datos de la cantidad de café procesado en todo el ciclo de cosecha para obtener el dato de agua total utilizado en cada beneficio en

promedio, la medición de los sistemas ecológicos se realizó para comparar la diferencia en el gasto de agua.

RESULTADOS

Para el cálculo de la huella virtual verde gris, el gasto de agua en el beneficiado y la suma total (**Tabla 3**) se aplicaron las fórmulas mostradas en la metodología. A continuación, se muestran los resultados obtenidos. Al final se realiza la suma total incluyendo el cálculo de gasto de agua en el proceso de beneficiado del grano de café, el cual fue calculado a partir de la medición del proceso en cinco instalaciones de la región de Huatusco Veracruz, México.

En cuanto a los beneficios de café, en la (**Tabla 4**) se muestra el cálculo del gasto de agua en todo el proceso de beneficiado de café en cinco beneficios de la región de estudio, los volúmenes más altos están relacionados con un mayor número de toneladas de café que se procesan en estas instalaciones, dos de ellos alcanzan un gasto de 566 m^3 de agua en el caso del beneficio tres y 162 m^3 de agua/kg de café cereza. Para el beneficio cinco ubicado en Sabanas municipio de Huatusco en cada kilogramo de café cereza procesado. El gasto de agua total encontrado sumando la huella hídrica virtual gris y el gasto en beneficio fue de **1132.74 m^3/kg de café producido.**

Los beneficios uno y dos son considerados ecológicos debido a la maquinaria que utilizan en donde el uso de agua se ve reducido debido a que no lavan el café para eliminar el mucilago del grano, sino que lo eliminan de manera mecánica, lo que hace que disminuya el uso de agua. Se encontró que el beneficio dos fue el que menos agua utilizó 10.7L/kg de café cereza, el beneficio uno presentó un gasto tres veces mayor 30 L/kg de café cereza procesado.

DISCUSIÓN

En el estudio de Tarazona *et al.* (2023) quienes obtuvieron la huella virtual en el cultivo de café a nivel de microcuenca del río Tona con superficie de 193.8 km^2 y rendimiento de 1250 kg/ha de café, reportan que la huella hídrica total fue de 3759663.2 m^3 para el año 2017 y de 4132333.1 m^3 para el año 2020 en su trabajo además de utilizar el programa CROP WAT delimitaron la cuenca.

Tabla 3. Cálculo de la Huella virtual verde, gris, beneficiado y total.

Huella calculada	Fuente para el cálculo	Resultado
Huella virtual verde	Producción en campo	190.92 m^3/kg café producido
Huella virtual gris		786.24 m^3/kg de café producido
Sumatoria de huella verde y gris		977.61 m^3/kg de café producido
Sumatoria de huella verde, gris y beneficiado	Producción e Instalaciones de beneficiado	1132.74 m^3/kg de café producido

Tabla 4. Cálculo de uso de agua en beneficios de la región de Huatusco Veracruz, México.

Beneficios	Localización	Fuente de agua	Kg de café cereza	Agua Utilizada	Huella Virtual total
Beneficio 1	Huatusco- Totutla. Ver.	Arroyo	70000	30.84 m ³	32.04 m ³ /kg de café cereza
Beneficio 2	Chocaman. Ver.	Arroyo	70000	9.57 m ³	10.77 m ³ /kg de café cereza
Beneficio 3	Huatusco. Ver.	Arroyo	4 050 000	565.05 m ³	566.02 m ³ /kg de café cereza
Beneficio 4	Tepetzingo Huatusco. Ver.	Arroyo y agua colectada	360 000	2.80 m ³	4.02 m ³ /kg de café cereza
Beneficio 5	Sabanas, Huatusco. Ver.	Arroyo	630 450	161.64 m ³	162.84 m ³ /kg de café cereza
Promedio				155.14 m³/kg de café cereza	

López (2018) encontró que en cultivos de café y caña de azúcar suman el 50% de la huella virtual en la cuenca de Boyacá, Colombia, con un total de 23744 m³/t¹. Siendo el café el que mayor consumo de agua genera 18809 m³/t¹, 16 veces mayor que este trabajo, evaluaron las tres huellas virtuales, azul, gris y verde y en el caso de esta investigación donde el valor de la huella virtual azul es cero.

Arcos (2012) realizó durante cuatro años una evaluación en donde calculó que la huella azul es mayor que la huella virtual verde, azul y gris, el café tiene un promedio de 11019 m³/t¹ de café producido. El gasto de agua en el sector productivo de café en Ecuador es 9.7 mayor comparado con este trabajo de investigación.

En otro estudio desarrollado por Ortiz-Caballero (2014) los datos de ambas huellas (verde y gris) la primera con 19966.3 m³/t¹ y la segunda con 1666.7 m³/t¹ son mucho más altos, mencionando que el café 92% de agua que es el que requiere más para su desarrollo. La huella virtual verde es 95% más alta y la huella virtual gris es de menor, apenas un 67% en el estudio que se desarrolló en la región de Huatusco.

En Honduras, Bolaños (2011) menciona que la huella virtual del cultivo de café fue de 13836.8 m³/t¹, la huella virtual gris fue de 898.6 m³/t¹, y la verde fue de 12938 m³/t¹, la huella gris es 13% menor en el estudio que realizamos donde se obtuvo un valor de 786 m³/t¹. Para el caso de la huella virtual verde esta apenas representa un 1.1 % con un valor de 190.1 m³/t¹, comparados con los datos obtenidos por Bolaños.

Torres *et al.* (2023) calcularon la huella hídrica en relación con la producción de café y encontró que se tuvo 15,249 m³/t¹ en Risaralda, Colombia, la cual resultó superior a la reportada en el presente estudio que fue de 977.16 m³/t¹. Así, en el departamento de Risaralda, Colombia Garay & Rivero (2014) analizaron que el gasto de agua en todo el proceso de beneficiado de café es de 2941 m³/kg de pergamino seco, cuyo trabajo fue desarrollado a nivel cuenca. Este

dato es mayor que el presentado en este trabajo que fue una huella hídrica de 1132.74 m³/kg de café producido. Esto es superior a lo mencionado por Rodríguez *et al.* (2015), quienes mencionan que en Colombia el beneficiado húmedo tradicional alcanza hasta 40L/kg de café pergamino seco, este dato es menor al encontrado en dos de los beneficios húmedos analizados en el trabajo de la región cafetalera de Huatusco, en el trabajo de Rodríguez *et al.* (2015), los autores solo tomaron en cuenta el gasto en beneficio sin medir la huella hídrica verde y gris.

Ngo *et al.* (2018), encontraron una huella hídrica en la producción de café verde de 13000 m³/t¹, esto para regiones productoras con condiciones normales de precipitación, en regiones donde se presentó mayor sequía la huella hídrica se incrementó hasta 15918 m³/t¹, estos datos son mayores comparados con los aquí presentados donde la huella virtual llegó a los 1132.4 m³/t¹. Lo cual permite observar que las regiones productoras con afectaciones debido al calentamiento global se verán más presionadas en relación con el uso del recurso agua. Silva *et al.* (2022), encontraron una huella virtual de 13862 m³/t¹ en cafetales de sombra, lo que contrasta con este estudio donde la huella virtual total fue de 1134.74 m³/t¹.

Mekonnen y Hoekstra (2011) reportaron para la huella virtual verde de 15239 m³/t¹, y la huella gris de 532 m³/t¹. El valor de la huella verde fue muy alto 98% aproximadamente, comparado con la encontrada en este estudio de 190.94 m³/kg de café producido, la huella virtual gris por su parte fue menor, en este trabajo se encontró una huella de 790 con un 1.48 mayor que la que mencionan los autores de 532 m³/t¹.

Por otro lado, En Colombia, Jiménez (2017), reportó que la huella virtual verde fue de 11001 m³/t¹, la huella azul de 7014 m³/t¹, y la huella virtual gris de 107 m³/t¹, en relación el estudio la huella virtual gris fue menor comparada con la que se encontró en este trabajo que fue 786.30 m³/kg de café producido, 7.3 veces mayor.

En Vietnam (Hoang y Nguyen, 2019) obtuvieron una huella virtual de 1223 m³/ton⁻¹, esta se incrementó por el uso de N y P en el campo, estos datos son mayores a los 1132.70 m³/t⁻¹ determinados en el presente estudio. En su estudio midieron el gasto de agua donde se utilizó un beneficiado ecológico y redujeron el uso del agua con 0.7 a 1 L/café pergamino seco, a diferencia de lo hallado en este trabajo que fue de 10L/café pergamino seco que utilizó en beneficio número dos (**Tabla 4**), en la región de Huatusco Ver., México.

Leal-Echeverry y Tobón (2023) midieron la huella virtual en el cultivo de café al igual que en el trabajo que se desarrolló en la región de Huatusco, Ver, mencionan que no se requiere agua para regar el café, porque su huella virtual azul fue cero y la huella virtual total que encontraron en producción fue de 3149 m³/t⁻¹, dos veces mayor que lo encontrado en este estudio la cual fue de 1132.74 m³/kg de café pergamino seco.

Calderón-Carrero y Moya-Garzón (2017) evaluaron únicamente la huella virtual verde y gris, los resultados de la huella gris son más altos 1683.83 m³/t⁻¹ comparados con los obtenidos en este estudio que fue de 1132.78 m³/kg de café pergamino seco, y para el caso de la huella virtual gris obtuvieron 845.07 m³/t⁻¹, apenas 1.07 arriba que el estudio desarrollado en la región de Huatusco Veracruz con una huella virtual gris de 786.10 m³/kg de café pergamino seco.

Pérez (2012) obtuvo lo siguiente: huella virtual verde: 10559 m³/t⁻¹ superior a los datos de la región que se estudió en donde no se tomó en cuenta la parte de vivero, como sí lo realizó este autor, quién midió el gasto de agua desde el semillero hasta producción, con una huella hídrica azul o riego: 8148 m³/t⁻¹ y huella gris: 111 m³/t⁻¹, en el caso de huella azul fue cero ya que no se realiza riego, para la huella gris esta fue menor comparada con la que se obtuvo en esta investigación la cual fue 7.08 mayor con un total obtenido de 786.10 m³/kg de café pergamino seco.

Bustamante *et al.* (2015) señalan que las deficiencias hídricas son necesarias para la floración, pero si estas son muy prolongadas no permiten la apertura floral, limitan el crecimiento vegetativo y el llenado de los frutos. Por otra parte, los excesos hídricos disminuyen la floración. En el mismo sentido, en sus escenarios de cambio climático para la zona centro del estado de Veracruz, se plantean una disminución de la precipitación en un 7.5% y acentuándose más en los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo, lo que repercutiría en una disminución de los rendimientos, provocado por la falta de agua (Rivera-Silva *et al.*, 2013). Los valores obtenidos de la huella virtual verde 190.92 m³/kg de café pergamino seco y gris de 786.10 m³/kg de café pergamino seco, son menores que los que reporta Echeverri y Tobón (2021) en donde

alcanzan valores de 1749 m³/t⁻¹ y 1400 m³/t⁻¹, para las huellas hídricas verde y gris, respectivamente.

Moberg (2016) midió el agua virtual verde, azul y gris en un trabajo realizó en Mirafior, Nicaragua, el total de huella virtual encontrada fue de 20049 m³/t⁻¹ de café producido. Esta cantidad de agua utilizada es 18.5% mayor que la encontrada en este estudio donde al agua virtual total fue de 1132.7492 m³/kg de café pergamino seco. De igual forma tanto el agua virtual verde y gris estimadas en Nicaragua, la primera de 2288.292 m³/kg de café pergamino y la segunda de 17278.592 m³/kg de café pergamino seco, fueron superiores a las evaluadas en este estudio donde la huella gris fue de apenas el 28% comparada con la encontrada en Nicaragua con un 72% y la huella verde de apenas el 33% comparada con la encontrada en la investigación hecha en Nicaragua superior en un 67%. En este sentido la huella encontrada en la región de Huatusco es menor en relación con el gasto de agua.

CONCLUSIONES

La huella virtual en la producción de café en parcela fue de 977.61 m³/kg de café cereza procesado, tomando en cuenta también que la huella virtual azul es cero debido a que en la región de estudio no se utiliza riego, cuando se suma esta huella virtual de producción al gasto de agua en beneficio se tiene un incremento de la huella virtual. En el beneficio tres se alcanzó un gasto de 566 m³/kg de café cereza procesado, y en el beneficio cinco se tuvo la cantidad de 162 m³/kg de café cereza procesado. El promedio obtenido sobre gasto de agua fue 155.14 m³/kg de café cereza procesado. En total se obtuvo una huella virtual gris, verde y de gasto de agua en el beneficiado de café de: 1132.74 m³/kg de café cereza producido. Esto es un foco de atención que se debe tomar en cuenta por todos los actores involucrados actualmente en la cafecultura nacional, gobierno, empresas, organizaciones y sociedad civil, ya que la problemática por el uso del recurso hídrico se encrudecerá en los próximos años.

Funding. The authors declare that they have not received any funds to carry out this investigation.

Conflict of interest. There is no conflict of interest between us and the journal, or any other instance or institution related to this investigation.

Compliance with ethical standards. Do not apply

Data availability. Data are available from S. Sánchez-Hernández ser89nangio@gmail.com upon request.

Author contribution statement (CRediT). S. Sánchez-Hernández: fieldwork, writing, analysis of the information, and editing. J.G. Cruz-Castillo:

Formal analysis, conceptualization, data curation, writing, review, and editing. **J.G. Partida-Sedas:** conceptualization, writing, review and editing. **E. Escamilla-Prado:** review and editing. **E. Valdés-Velarde:** review and editing.

REFERENCES

- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L. and Burman, R.D., 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81 pp. 650-662. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100040019x>
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes. and M. Smith., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation Drain*, 56, 147-151. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Crop%20evapotranspiration%3A%20guidelines%20for%20computing%20crop%20water%20requirements&author=R.G.%20Allen&publication_year=1998
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: *FAO*, 298(0). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Álvarez-Sánchez, M.E., Maldonado-Torres, R., Nájera-Rosas, C. and Cristóbal-Acevedo, D., 2020. Manejo agroecológico para la restauración de la calidad del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), pp. 741-752. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2462>
- Arcos, S.I.P., 2012. Evaluación y análisis de la huella hídrica y agua virtual de la producción agrícola en el Ecuador. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/105eeca8-ce9d-4827-b30a-e3f1c2266aca/content>
- Bolaños, M.E., 2011. Determinación de la huella hídrica y comercio de agua virtual de los principales productos agrícolas de Honduras. Tesis de Ingeniería. Zamorano, Honduras. pp. 22-30. <https://bdigital.zamorano.edu/items/479beb7c-f3cd-433f-a328-051e4078547a>
- Bustamante González, C., Pérez Díaz, A., Rivera Espinosa, R., Martín Alonso, G.M. and Viñals Nuñez, R., 2015. Influencia de las precipitaciones en el rendimiento de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner cultivado en suelos Pardos de la región oriental de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 36(4), pp. 21-27. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S025859362015000400003&script=sci_arttext&tlng=en
- Calderón Carrero, P.A. and Moya Garzón, L.K., 2017. Cálculo comparativo de la huella hídrica como criterio de sostenibilidad para el sistema productivo de café en la microcuenca Quebrada Cune, municipio Villeta Cundinamarca. Tesis de licenciatura. Universidad de la Salle. Bogotá. Colombia. pp. 49-75. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1379&context=ing_ambiental_sanitaria
- Cisneros Zayas, E., Rey García, R., Martínez Varona, R., López Seijas, T. and González Robaina, F., (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el cafeto en la provincia de Pinar del Río. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2), pp. 23-30. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_artext&pid=S2071-00542015000200004&lng=es&nrm=iso
- Escamilla Prado, E., 2007. Influencia de los factores ambientales, genéticos, agronómicos y sociales en la calidad del café orgánico en México. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Campus, Veracruz México. pp. 267. <http://hdl.handle.net/10521/1625>
- Fernández-Ojeda, P.R., Acevedo, D. C., Villanueva-Morales, A., and Uribe-Gómez, M., 2016. Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas natural, agroforestal y monocultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, (35), pp. 65-77. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000300065&lng=es&nrm=iso
- Garay, J., and Rivero, J., 2014. Biosistema para purificar aguas residuales del beneficio húmedo de café, distrito La Coipa, departamento de Cajamarca, 2014. *Manglar*, 11(1), pp. 43-50. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2014.006>
- Hoang, V. and Nguyen, A. (2019). PGI Buon Ma Thuot Coffee in Vietnam. *Sustainability of European Food Quality Schemes: Multi-Performance, Structure, and Governance of PDO, PGI, and Organic Agri-Food Systems*, pp. 265-285. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27508-2>

- Hoekstra A.Y., 2003. Virtual Water. An Introduction. En: Virtual Water Trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12. Delft, The Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education. pp. 13- 23
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M., 2009. *Water footprint manual*. Enschede, The Netherlands: Water footprint network. pp. 1-131. <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/5146564/Hoekstra09WaterFootprintManual.pdf>
- Inegi., 2010. Compendio de información geográfica municipal. Veracruz, Veracruz de Ignacio de la Llave. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30193.pdf
- Jiménez, K.M., Yaguache, J.V.O. and Escalante, M.G.T., 2017. Especialización productiva mediante un proceso de selección multicriterio, que considere la huella hídrica de los productos en la provincia de Loja, Ecuador. *Revista Ciencias Estratégicas*, 25(37), pp. 181-210. <https://www.redalyc.org/pdf/1513/151353628010.pdf>
- Leal-Echeverri, J.C. and Tobón, C., 2021. The water footprint of coffee production in Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(3), 9685-9697. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.91461>
- López, K.L.G., 2018. Cuantificación de la huella hídrica en la microcuenca del río Sunuba en el municipio de Guayatá, Boyacá. Colombia. Tesis de Licenciatura. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia. pp. 50-64. <https://hdl.handle.net/10983/22377>
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y., 2011. La huella hídrica verde, azul y gris de los cultivos y productos derivados de cultivos. *Hidrología y Ciencias del Sistema Terrestre*, 15(5), pp. 1577-1600. https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_Spanish.pdf
- Moberg, E., 2016. The water footprint of coffee production in Miraflores, Nicaragua. Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Science, Uppsala University. UPTec W 16 008, pp. 68. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:913058/FULLTEXT01.pdf>
- Ngo, T.T., Le, N.T., Hoang, T.M. and Luong, D.H., 2018. Water scarcity in Vietnam: a point of view on virtual water perspective. *Water Resources Management*, 32, pp. 3579-3593. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2007-4>
- Nom-001-SEMARNAT., 1996. Norma 001 oficial que establece los límites máximos permisibles de contaminantes de las descargas de aguas residuales y bienes nacionales. México. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>
- Ortiz-Caballero, L.D., 2014. Cálculo de la huella hídrica de los sistemas productivos agrícolas de la microcuenca Quebrada Cune, municipio de Villeta Cundinamarca. Tesis de Ingeniería. Universidad de la Salle. Bogotá. Colombia. pp. 163. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1959&context=ing_ambiental_sanitaria
- Partida Sedas, S., Partidas Sedas, J.G. and Cabal Prieto, A. and Gonzalez Reséndiz, J.D., 2021. Evaluación de un sistema agroecológico minifundista familiar alternativo a las formas de producción de café predominante en Huatusco, Veracruz. *Brazilian Journal of Agroecology and Sustainability*. 3(1), <https://doi.org/10.52719/bjas.v3i1.4205>
- Pérez, S.I., 2012. Evaluación y análisis de la huella hídrica y agua virtual de la producción agrícola en el Ecuador. Tesis de licenciatura. Zamorano, Honduras. pp. 15-30. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/911>
- Rivera Silva, M.D.R., Nikolskii Gavrilov, I., Castillo Álvarez, M., Ordaz Chaparro, V.M., Díaz Padilla, G. and Guajardo Panes, R.A., 2013. Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana*, 31(4), pp. 305-313. http://www.scielo.org.mx/article_plus.php?pid=S0187-57792013000500305&tling=es&lng=es
- Rodríguez-Valencia, N., Zambrano Franco, D.A. and Ramírez, C.A., 2013. Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual

- del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura, *Cenicafé*, 3, pp. 111–136. https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4347/1/cenbook-0026_31.pdf
- Rodríguez, N., Sanz, J.R., Oliveros, C.E. and Ramírez, C.A., 2015. *Beneficio del café en Colombia: Prácticas y estrategias para el ahorro uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café*. Manizales: Cenicafé, pp. 37, <http://hdl.handle.net/10778/659>
- Sánchez, M. and Carvacho, L., 2006. Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. *Revista de Geografía Norte Grande*, (36), pp. 49-60. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200003>
- Silva, L.M.R., Ribeiro, M.D.F., Ferreira, W.P.M., Rocha Junior, P.R.D. and Fernandes, R.B.A., 2022. Water footprint of Arabica coffee from “Matas de Minas” under shade management. *Revista Ceres*, 69, pp. 488-494. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269040015>
- Suazo, A.R.C., 2023. Productores agroindustriales de café de la zona Huatusco, y el establecimiento de relaciones comerciales con empresas chinas. Tesis de maestría, Xalapa. Ver. México. pp. 107. https://www.uv.mx/mescal/files/2021/05/Tesis_Andres-25Enero23.pdf
- Tarazona, M.H., Jiménez, C.F.A., Durán, Y. P.V., Gómez-Melo, D., Gómez-Herrera, S., López-Moreno, J.M. and Villota-Paz, J.M., 2023. conocimientos para un futuro sostenible. Tesis ingeniería. Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. pp. 163. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/51983/2023Hern%c3%a1ndezMassiel.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Torres, C., Gitau, M., Lara-Borrero, J., Paredes-Cuervo, D. and Daher, B., 2023. Urban FEW Nexus Model for the Otun River Watershed. Authorea Preprints. pp. 1-44. <https://essopenarchive.org/doi/full/10.22541/essoar.169008310.09765430>
- Torres, M.C.D., Carvajal, H.S.M., Trujillo, A.R. and Cobo, N.U., 2017. Necesidades hídricas de estevia calculadas con el coeficiente del cultivo. *Agronomía Mesoamericana*, 28(2), pp.509-521. <http://dx.doi.org/10.15517/ma.v28i2.24354>
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C. and Hernández, J., 2009. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, 34(5), pp. 322-329. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000500006&lng=es&nrm=iso
- Viveros-García, B.E., Viveros-Contreras, R., Medina-Mendoza, V. and García-Moctezuma, H., 2022. Desarrollo de un servicio climático basado en datos científicos y comunitarios para uso agrícola, en una región cafetalera de Veracruz, México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(5), pp. 3373-3392. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i5.3324